Iranian Journal of Animal Science Research
Homepage: http://ijasr.um.ac.ir

CC BY

Research Paper
Vol. 15, No.3, Fall 2023, p. 397-411

Using Nonlinear Growth Models to Fit the Egg Production Curve in Khazak Hen

Hadi Faraji Arough [1,2]*, Mahmoud Ghazaghi [3], Mohammad Rokouei [4]

Received: 18-06-2022
Revised: 14-01-2023
Accepted: 05-02-2023
Available Online: 05-02-2023

How to cite this article:
Faraji-Arough, H., Ghazaghi, M., & Rokouei M. (2023). Using nonlinear growth models to fit the egg production curve in Khazak hen. *Iranian Journal of Animal Science Research*, *15*(3), 397-411.
DOI: 10.22067/ijasr.2023.77219.1080

Introduction: The egg production curve is defined graphically as the relationship between the number of eggs and laying time, which indicates the biological efficiency of a hen and can be effective in the selection and nutritional management of laying hens. Egg production is an essential section of the poultry industry. Appropriate mathematical models accurately represent the production phases of the hen and provide a valuable tool for biological comparisons and interpretations. Also, egg production curves help predict egg production, determine the appropriate age for poultry culling, and economic decisions. Sigmoid growth models are often used to describe size over time in plants, animals, and humans. In laying hens, the shape of the cumulative egg production curve is similar to the growth curve. Therefore, different growth models may be used to model the cumulative egg production curve. Khazak hen is one of the native birds of the Sistan region (Iran), and natural selection has adapted this bird to the conditions of Sistan over the years. The body of this chicken is small, and has low growth and is mainly kept for egg production. Since laying patterns is different in populations. Thus, the use of an appropriate model to describe the specific laying pattern of each population is necessary. Therefore, this study was conducted to investigate growth models to describe the cumulative egg production and weight of eggs and select the best model for the Khazak hen.

Materials and Methods: The present study was conducted in the Research Center of Domestic Animals (RCDA), the Research institute of Zabol, Zabol (Iran). Khazak pullets are identified using foot-banded numbers before they start laying. During the experiment, all birds had access to water and feed ad libitum. The egg production was recorded daily for each hen separately. Based on daily records, the weekly egg production of each bird was calculated and then used the calculation of the cumulative egg production. A total of 365 pellet egg production records were used to analyze the production curve from the first to the fortieth

1- Assistant Professor, Research Center of Special Domestic Animals, University of Zabol, Zabol, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Ostrich, Special Domestic Animals Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Animal Science, Agriculture Faculty, University of Zabol, Zabol, Iran.
4- Professor, Department of Animal Science, Agriculture Faculty, University of Zabol, Zabol, Iran.
*Corresponding Author's Email: hadifaraji@uoz.ac.ir

week of laying. Five growth models (Gompertz, Logistics, Richards, Lopez, and Weibull) were fitted on cumulative egg production and weight records. The goodness of fit criteria, including Akaike information criterion (AIC), mean square error (MSE), Bayesian information criterion (BIC), and adjusted coefficient of determination (R^2_{Adj}), were used to compare the growth models and to select the best model. All models were fitted on egg production records using the nlme package in R software, and the parameters of each model were estimated. After fitting the models, the cumulative production values for different ages were predicted by the models and were compared with the actual values over 40 weeks.

Results and Discussion: Based on the goodness of fit criteria, the Lopez mod had the highest R^2_{Adj} value and lowest values of AIC, BIC, and MSE for cumulative egg production. While the Weibull model was the best model than other models to describe cumulative egg weight in terms of the goodness of fit criteria. The Gompertz and Logistic models overestimated initial production and underestimated the final production compared with other models. Estimates of time and production at the inflection points using Lopez and Weibull models were close to actual values of cumulative egg production and weight, respectively. Also, prediction of cumulative egg production and egg weight in different weeks using Lopez and Weibull models was accurately, respectively. In literature, various models were reported as the best model to describe the egg production curve, which indicates that the appropriate model specific to each breed should be used to evaluate its curve. The overestimation and underestimation of initial and final production using Logistic models were reported in other research that was similar to our findings. The important application of egg production models in poultry is to estimate the economic and genetic value by predicting total egg production from some records, which can be a suitable tool for biological comparisons and interpretations.

Conclusion: The results of the present study, showed that the Lopez and Weibull models were the best models to describe the cumulative egg production and egg weight based on four good fit criteria, respectively. Therefore, these models can be used to describe the cumulative egg production and egg weight in Khazak hens. The application of these growth models can be useful to nutritional management and breeding programs to improve and change cumulative egg production and egg weight.

Keywords: Cumulative egg production, Inflection point, Lopez model, Modelling, Native hen

نشریه پژوهشهای علوم دامی ایران
Homepage: http://ijasr.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص. ۴۱۱-۳۹۷

استفاده از مدل‌های غیر خطی رشد برای برازش منحنی تولید تخم در مرغ خزک

هادی فرجی آروق[۱،۲*]، محمود قزاقی[۳]، محمد رکوعی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱۰/۰۳/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مدل‌های غیر خطی رشد برای توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم در مرغ خزک و انتخاب مناسب‌ترین مدل غیر خطی رشد انجام شد. در مجموع، تولید تخم ۳۶۵ پولت مرغ خزک از هفته اول تا چهلم تخم‌گذاری برای ارزیابی استفاده شد. با استفاده از تولید و وزن تخم‌های تولید شده در هر هفته، تولید و وزن تجمعی تخم در طول چهل هفته محاسبه شد. پنج مدل رشد غیر خطی شامل مدل‌های گمپرتز، لجستیک، ریچاردز، لوپز و ویبول بر روی رکوردهای تجمعی تولید و وزن تخم برازش شده و مناسب‌ترین مدل برای تولید و وزن تجمعی تخم با استفاده از معیارهای نکویی برازش (ضریب تبیین تصحیح شده، میانگین مربعات خطا، معیار اطلاعات بیزی و معیار اطلاعات آکائیک) تعیین شد. نتایج نشان داد که علی‌رغم برازش همه مدل‌های رشد بر روی داده‌ها، مدل لوپز و ویبول به‌ترتیب براساس معیارهای نکویی برازش مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم در مرغ‌های خزک بودند. در مدل‌های رشد گمپرتز و لجستیک، تولید اولیه و تولید نهایی به‌ترتیب بالاتر و پایین‌تر از مدل‌های دیگر برآورد شد. زمان و میزان تولید در نقطه عطف با استفاده از مدل‌های لوپز و ویبول نزدیک‌تر به مقادیر واقعی بود. همچنین، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها با مقدار واقعی نشان داد که دو مدل لوپز و ویبول به‌ترتیب پیش‌بینی‌های صحیح‌تری برای تولید و وزن تجمعی تخم داشتند. با توجه به نتایج حاصل می‌توان از مدل‌های رشد لوپز و ویبول برای مطالعه منحنی تولید و وزن تخم تجمعی در مرغ خزک جهت مدیریت‌تغذیه‌ای و برنامه‌های اصلاح نژادی برای تغییر منحنی با صحت بالا استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تولید تجمعی تخم، مدلسازی، مدل لوپز، مرغ بومی، نقطه عطف

مقدمه

مرغ‌های بومی معمولاً برای تأمین گوشت و تخم (دو منظوره) پرورش داده می‌شوند و در مقایسه با نژادهای تجاری سرعت رشد پایین، تولید تخم مرغ کمتر، کرچی زیاد، وزن پایین بدن و سن بلوغ بالا دارند. امّا با این حال، دارای ویژگی‌های ممتاز دیگری از جمله گوشت با طعم و مزه بهتر و چربی کمتر (Haunshi *et al*., 2022)، زرده بزرگ‌تر (Lordelo *et al*., 2020)، ضخامت بیشتر پوسته و استحکام بالاتر پوسته تخم مرغ (Emamgholi Begli *et al*., 2010) می‌باشند که سبب برتری قیمت و مطلوبیت آن نسبت به مرغان تجاری شده است. مقاومت به انواع شرایط محیطی و بیماری ها، نیاز به هزینه کمتر جهت نگهداری، نیاز به شرایط ساده برای نگهداری و تولیدات ارگانیک از مرغان بومی از دیگر ویژگی‌های نژادهای بومی می‌باشد (Lee, 2006).

تولید تخم به‌صورت تعداد تخم‌های گذاشته شده در یک لانه مرغ یا کل تعداد تخم‌های تولید شده توسط پرندگان زنده (روز مرغ) در طول یک دوره خاص (روزانه، هفتگی، ماهانه، سالانه) تعریف می‌شود و یا به‌صورت نسبت کل تخم‌های تولید شده توسط تعدادی از حیوانات بیان می‌شود. تولید تخم یک حیوان در طول دوره تولید می تواند به‌صورت تجمعی نیز باشد؛ با این حال، این یک روش انتخاب برای اهداف پرورشی و اصلاح نژادی نیست (Narinc *et al*., 2013). منحنی تولید تخم به‌صورت توصیف نموداری رابطه بین تعداد تخم و زمان تخم‌گذاری تعریف می‌شود که نشان‌دهنده کارایی بیولوژیکی یک مرغ بوده و می‌تواند در انتخاب و مدیریت تغذیه در مرغان تخم‌گذار مؤثر باشد (Fairfull and Gowe, 1990).

۱- استادیار، پژوهشکده دامهای خاص، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲- استادیار، گروه پژوهشی شترمرغ، پژوهشکده دام‌های خاص، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران.
۳- استادیار، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۴- استاد، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
(*- نویسنده مسئول: (Email: hadifaraji@uoz.ac.ir
DOI: 10.22067/ijasr.2023.77219.1080

منحنی تولید تخم در مرغ‌ها از نظر شکل مشابه منحنی شیردهی در گاو است و مدل‌هایی مانند گامای ناقص برای مدل‌سازی تولید شیر استفاده می‌شود (Wood, 1967; Gavora *et al*., 1982; Narinc *et al*., 2013). بنابراین، مدل‌های توصیف‌کننده شکل منحنی شیردهی برای مدل‌سازی منحنی تولید تخم نیز سازگاری دارند (Wolc *et al*., 2015) و همانند منحنی شیردهی می‌توان نرخ افزایش قبل از اوج تولید، اوج تولید، نرخ کاهش بعد اوج تولید و تداوم تولید برای مرغان تخم‌گذار به‌دست آورد (Grossman *et al*., 2000; Narinc *et al*., 2014). مدلی که اغلب برای منحنی تخم استفاده می‌شود، مدل گامای ناقص می‌باشد، زیرا کاربرد نسبتاً ساده، تفسیر آسان و بهترین برازش با داده‌ها دارد. علاوه‌براین، مدل‌های جزء به جزء، جزء به جزء تصحیح شده، مدل لجستیک، نمایی و چند جمله‌ای نیز استفاده می‌شوند (Narinc *et al*., 2014).

تولید تخم بخش مهمی از صنعت طیور است. مدل‌های ریاضی مناسب به‌طور دقیق فاز تولید مرغ را نشان می‌دهد و ابزار مناسبی برای مقایسه‌ها و تفسیرهای بیولوژیکی فراهم می‌کند. منحنی‌های تولید تخم در پیش‌بینی تولید تخم، تعیین سن مناسب حذف مرغ و تصمیمات اقتصادی کمک می‌کند (Aggrey, 2002; Savegnago *et al*., 2012). تولید تخم نتیجه تعداد زیادی ژن از طریق فرایندهای بیوشیمیایی، آناتومیکی و فیزیولوژیکی است. این صفت در طیور یک صفت کمی پیچیده است که تنوع تولید تخم فردی قابل توجهی را در دوره تخم‌گذاری نشان می‌دهد (Sharifi *et al*., 2022). مدل‌های آماری مورد استفاده برای توصیف منحنی تولید تخم بسیاری از تصمیمات مدیریتی را پشتیبانی می‌کنند تا برای افزایش تولید تخم استفاده شود (Wolc *et al*., 2011). همچنین استفاده از مدل‌های ریاضی در پرورش عملی طیور برای پیش‌بینی تولید تخم در یک دوره سالانه یا هر دوره انتخابی دیگر با استفاده از قسمتی از رکوردها برای تسهیل انتخاب زود هنگام پرندگان مولد از اهمیت بالایی برخوردار است (Bindya *et al*., 2010; Abraham *et al*., 2017; Ahmadu *et al*., 2017). استفاده از مدل‌های غیر خطی برای برازش تولید تخم در جمعیت‌های مختلف این امکان را فراهم می‌کند تا تولید تخم بین آن‌ها مقایسه شود. به این ترتیب، تولید تخم می‌تواند بین لاین‌های انتخاب شده و انتخاب نشده مرغ مقایسه شده تا تغییرات در منحنی تولید تخم که به‌وسیله انتخاب صورت می‌گیرد، مطالعه شود (Sharifi *et al*., 2022).

مدل‌های رگرسیون غیر خطی که عمدتاً در مطالعات برای نشان دادن تغییرات وابسته به زمان تولید تخم استفاده شدند، شامل مدل‌های گاما، مک نالی، آدامز–بل، جزء به جزء، جزء به جزء تصحیح شده، لجستیک، گلور، لخورست و توابع ناروشین تاکما با سه تا هفت پارامتر برآوردی می‌باشند (Narinc *et al*., 2014). به هر حال، استفاده از مدل‌های رشد در مطالعات برای توصیف منحنی تولید تخم کمتر گزارش شده است. در بررسی منحنی تولید تخم نژاد لگهورن سفید سنتز شده، مدل‌های رشد مورد بررسی واقع شده و براساس معیارهای نکویی برازش، مدل مورگان مرسر فلودین (لوپز) به‌عنوان مدل مناسب برای برازش منحنی تولید تخم در این پرنده گزارش شد (Sharifi *et al*., 2022). پنج مدل گمپرتز، ریچارد، لجستیک، خطی و نمایی بر روی تولید تخم هفتگی دو لاین پدری و مادری نژاد قهوه‌ای شیکا مورد برازش قرار گرفت و مدل نمایی براساس معیارهای نکویی برازش به‌عنوان مدل مناسب برای توصیف تولید تخم در این دو لاین گزارش شد (Ahmadu *et al*., 2017). در تحقیق دیگری، استفاده از مدل‌های رشد برای برازش منحنی تولید تخم تجمعی تخم در مرغ‌های تخم‌گذار و مرغ اجداد جوجه‌های گوشتی مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد که مدل مورگان و متعاقب آن مدل ریچاردز پیش‌بینی‌های صحیح‌تر از تولید تخم هفتگی داشتند و به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای برازش تولید تخم هفتگی در مرغ‌های ذکر شده گزارش شدند (Darmani Kuhi and France, 2019).

مدل‌های رشد سیگموئیدی اغلب برای توصیف اندازه گیاهان، حیوانات و انسان‌ها در طول زمان استفاده می‌شوند (Thornley and France, 2007). در مرغ‌های تخم‌گذار، شکل منحنی تولید تخم تجمعی مشابه منحنی رشد است؛ بنابراین، توابع مختلف رشد ممکن است برای مدل‌سازی منحنی تولید تجمعی تولید تخم مورد استفاده قرار گیرند. منحنی تولید تخم مرغ تجمعی مسیر صاف‌تری را نسبت به منحنی تولید تخم مرغ معمولی نشان می‌دهد و در صورت عدم وجود چند رکورد، این امر به‌میزان کمتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد و حساسیت کمتری نسبت به وقوع داده‌های پرت یا گم شده دارد (Darmani Kuhi and France, 2019). مرغ خزک جزء پرنده‌های بومی در اقلیم سیستان می‌باشد که در طول سال‌ها انتخاب طبیعی سازگاری خوبی با شرایط سیستان پیدا کرده است. این مرغ به‌دلیل داشتن پاهای کوتاه به‌نام خزک نام گرفته است. جثه این مرغ بسیار کوچک بوده و دارای رشد کم می‌باشد و بیشتر جهت تولید تخم نگهداری می‌شود. با توجه به اینکه الگوی تخم‌گذاری در جمعیت‌ها متفاوت می‌باشند و استفاده از مدل مناسب جهت توصیف الگوی تخم‌گذاری برای درک بهتر نرخ تخم‌گذاری، برنامه‌های تغذیه‌ای و اصلاح نژادی ضروری می‌باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی مدل‌های رشد برای توصیف نرخ تولید و وزن تجمعی تخم و انتخاب مناسبترین مدل در مرغ خزک انجام شد.

جدول ۱- ترکیب (درصد) و مواد مغذی جیره مورد استفاده (درصد)
Table 1- Composition (%) and nutrients of the used diet (Percentage)

اجزای خوراک Ingredient	ترکیب Composition
ذرت Corn	62.75
کنجاله سویا (۴۴ درصد پروتئین خام) Soybean meal (44% CP)	18.05
دی کلسیم فسفات Dicalcium phosphate	0.90
گلوتن ذرت Gluten Meal	1.88
سنگ آهک Limestone	9.85
بیکربنات سدیم Sodium bicarbonate	0.31
نمک NaCl	0.28
مکمل معدنی Mineral premix[1]	0.25
مکمل ویتامینه Vitamin premix[2]	0.25
دی ال- متیونین DL- Methionine	0.13
ال- لایزین L-Lysine	0.10
روغن Oil	0.75
ترکیبات شیمیایی محاسبه شده Calculated chemical composition	
انرژی قابل متابولیسم (کیلوکالری/ کیلوگرم) Metabolizable energy (kcal/kg)	2800
پروتئین خام (درصد) Crude protein (%)	16.00
لیزین (درصد) Lysine (%)	0.78
متیونین (درصد) Methionine (%)	0.38
متیونین + سیستئین (درصد) Methionine + cysteine (%)	0.64
کلسیم (درصد) Calcium (%)	4.00
فسفر قابل‌دسترس (درصد) Available phosphorus (%)	0.30

[1] مکمل معدنی این موارد را در هر کیلوگرم جیره تأمین نمود: ۶۵ میلی‌گرم منگنز ۶۵؛ ۵۵ میلی‌گرم روی؛ ۵۰ میلی‌گرم آهن؛ ۸ میلی‌گرم مس؛ ۱/۸ میلی‌گرم ید؛ ۰/۳۰ میلی‌گرم سلنیم؛ ۰/۲۰ میلی‌گرم کبالت و ۰/۱۶ میلی‌گرم مولیبدن.

[2] مکمل ویتامینه این موارد در هر کیلوگرم جیره تأمین نمود: ۱۱۵۰۰ واحد بین المللی ویتامین A؛ ۲۱۰۰ واحد بین المللی کوله کلسیفرول؛ ۲۲ واحد بین المللی ویتامین E؛ ویتامین B_{12}، ۰/۶۰ mg؛ ریبوفلاوین، ۴/۴ mg؛ ۴۰ میلی‌گرم نیکوتین‌آمید؛ ۳۵ میلی‌گرم کلسیم پنتوتنات؛ ۱/۵۰ میلی‌گرم منادیون؛ ۰/۸۰ میلی‌گرم فولیک اسید؛ ۳ میلی‌گرم تیامین؛ ۱۰ میلی‌گرم پیریدوکسین؛ ۱ میلی‌گرم بیوتین؛ ۵۶۰ میلی‌گرم کولین کلراید و ۱۲۵ میلی‌گرم اتوکسی‌کوئین.

[1] Mineral premix provided per kilogram of diet: 65 mg Mn; 50 mg Fe; 8 mg Cu; 1.8 mg I; 0.30 mg Se; 0.20 mg Co; and 0.16 mg Mo.
[2] Vitamin premix provided per kilogram of diet: 11,500 IU vitamin A; 2,100 IU cholecalciferol; 22 IU vitamin E; 0.60 mg vitamin B12; 4.4 mg riboflavin; 40 mg nicotinamide; 35 mg calcium pantothenate; 1.50 mg menadione; 0.80 mg folic acid; 3 mg thiamine; 10 mg pyridoxine; 1 mg biotin; 560 mg choline chloride; and 125 mg ethoxyquin.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در پژوهشکده دام‌های خاص پژوهشگاه زابل واقع در شهرستان زهک انجام شد. شهرستان زهک با مختصات طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و

۵۵ دقیقه شمالی، در ارتفاع ۴۸۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است و دارای آب و هوای گرم و خشک با میانگین درازمدت بارندگی پنجاه و پنج میلی‌متر است. مرغ خزک به‌عنوان مرغ بومی سیستان در طی سه دهه اخیر نسل پایه آن در پژوهشکده دام‌های خاص پژوهشگاه به‌صورت صنعتی در سالن نگهداری می‌شوند و از سال ۱۳۹۴ ثبت شجره برای این پرنده آغاز شده و از سال ۱۳۹۶ ثبت رکورد تولیدتخم، صفات رشد، صفات باروری نیز انجام می‌گیرد. جهت انجام کارهای اصلاح نژادی و برنامه‌های انتخاب، ارزیابی ژنتیکی صفات در دسترس جهت تعیین معیار انتخاب ضروری می‌باشد. لذا بررسی منحنی تولید تخم با استفاده از مدل مناسب که دارای پارامترهای قابل توجیه بیولوژیک می‌باشد، می‌تواند در فهم بهتر منحنی تولید در این پرنده مؤثر بوده و همچنین پارامترهای مدل به‌عنوان صفات مهم در برنامه‌های اصلاح نژادی مد نظر قرار گیرد. در این مرکز پولت‌های خزک در گله پرورشی پژوهشکده دام‌های خاص قبل از شروع تخم‌گذاری با استفاده از پلاک‌های فلزی پا شماره‌گذاری شده و در قفس‌های به ابعاد ۳×۳ متر به نسبت یک قطعه خروس و شش قطعه مرغ انتقال داده شدند. در طول آزمایش همه پرندگان به آب و غذا به‌طور آزاد دسترسی داشتند و با استفاده از جیره تخم‌گذاری آردی (مش) حاوی ۲۸۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم انرژی قابل متابولیسم و ۱۶ درصد پروتئین خام تغذیه شدند. ترکیب و مواد مغذی جیره استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است. در هر قفس تله‌های تخم‌گذاری قرار داده شد تا تولید تخم روزانه برای هر مرغ به‌صورت جداگانه ثبت گردد.

براساس تولید تخم روزانه، تولید تخم هفتگی هر پرنده محاسبه شده و سپس برای محاسبه تولید تجمعی تخم در هر هفته، تولید تخم هفتگی آن هفته با مجموع تخم هفته ماقبل جمع شد. این منجر به یک منحنی افزایشی یکنواخت می‌شود که اغلب به‌شکل سیگموئیدی با یک فاز افزایشی و یک فاز کاهشی می‌شود. این دو فاز در نقطه عطف به هم وصل شده که در این نقطه تولید تخم شیب تندی داشته که مربوط به اوج تولید است. همین روند برای محاسبه وزن تجمعی تخم نیز استفاده شد، یعنی مجموع وزن تخم‌های تولید شده در هر هفته با مجموع وزن تخم‌های تولید شده در هفته‌های ماقبل جمع شد. در مجموع، رکوردهای تولید تخم ۳۶۵ پولت خزک از هفته اول تا چهلم تخم‌گذاری که از فروردین ۱۳۹۶ تا خرداد ۱۴۰۰ جمع‌آوری شده بودند، برای تجزیه و تحلیل منحنی تولید و وزن تجمعی تخم استفاده شد.

بعد از محاسبه تولید و وزن تجمعی تخم در هفته‌های مختلف برای هر مرغ، پنج مدل رشد (گمپرتز، لجستیک، ریچاردز، لوپز و ویبول) بر روی رکوردهای تولید و وزن تجمعی تخم برازش شد. معادله مدل‌های مورد استفاده به‌صورت معادلات زیر بودند:

معادله (۱): مدل گمپرتز (Gompertz, 1825)

$$W = W_0 \exp\{[1-\exp(-kt)]\ln(\frac{W_f}{W_0})\}$$

معادله (۲): مدل لجستیک (Robertson, 1908)

$$W = \frac{W_0 W_f}{[(W_0 + (W_f - W_0)\exp(-kt)]}$$

معادله (۳): مدل ریچاردز (Richards, 1959)

$$W = W_0 W_f/[W_0^m + (W_f^m - W_0^m)\exp(-kt)]^{1/m}$$

معادله (۴): مدل لوپز (Lopez, 2000)

$$W = (W_0 b^k + W_f t^k)/(b^k + t^k)$$

معادله (۵): مدل ویبول (Weibull, 1951)

$$W = W_f - (W_f - W_0)\exp[-(k \times Age)^m]$$

در معادله‌های بالا، W: تولید و وزن تجمعی تخم در هفته t، W_0، W_f و k: به‌ترتیب تولید تخم اولیه، تولید تخم مجانبی نهایی و ضریب رشد نسبی می‌باشد. پارامترهای b و m: به‌ترتیب سن در موقع به‌دست آوردن نصف حداکثر تولید و پارامتر شکل را نشان می‌دهند.

از چهار معیار نکویی برازش زیر برای مقایسه مدل‌های رشد مورد مطالعه و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم استفاده شد:

$$R^2_{Adj} = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-k}\right) * (1 - R^2_{model})\right] \quad \text{معادله (۶)}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad \text{معادله (۷)}$$

$$AIC = n.\ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \quad \text{معادله (۸)}$$

$$BIC = n.\ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + p.\ln(n) \quad \text{معادله (۹)}$$

در معادلات ۶ تا ۹، R^2_{Adj}: ضریب تبیین تصحیح شده، n و k: به ترتیب تعداد مشاهدات و پارامترهای مدل را نشان می‌دهند. R^2_{model}: ضریب تبیین است که به‌صورت 1-(SSE/SST) محاسبه می‌شود که SSE: جمع مربعات خطا و SST: جمع مربعات کل می‌باشد. همچنین MSE، AIC و BIC: به‌ترتیب میانگین مربعات خطا، معیار اطلاعات آکائیک و معیار اطلاعات بیزی را نشان می‌دهد. تمام مدل‌ها بر روی رکوردهای تولید تخم و وزن تجمعی با استفاده از بسته *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2014) نرم‌افزار R (نسخه ۴-۱-۲) برازش شده و با استفاده از پارامترهای هر مدل، زمان و تولید در نقطه عطف با استفاده از فرمول‌های جدول ۲ برآورد شدند. بعد از برازش مدل‌ها، مقادیر تولید تجمعی برای سنین مختلف توسط مدل‌ها پیش‌بینی شده و منحنی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی در طول ۴۰ هفته مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۲- فرمول محاسبه زمان (t_i) و تولید (p_i) در نقطه عطف در مدل‌های مختلف رشد

Table 2- Calculation formula of time (t_i) and production (p_i) at inflection point in different growth models

مدل Model	زمان در نقطه عطف t_i	تولید در نقطه عطف p_i
گمپرتز Gompertz	$\frac{1}{k}\left[\ln\left(\ln\left(\frac{W_f}{W_0}\right)\right)\right]$	$\frac{W_f}{e}$
لجستیک Logistic	$\frac{1}{k}\ln\left(\frac{W_f-W_0}{W_0}\right)$	$\frac{W_f}{2}$
ریچادز Richards	$\frac{1}{k}\times\ln\left(\frac{m}{(W_f^m-W_0^m)/W_0^m}\right)$	$\frac{W_f}{\sqrt[m]{m+1}}$
لوپز Lopez	$b\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^{1/2}$	$\frac{\left[\left(1+\frac{1}{k}\right)W_0+\left(1-\frac{1}{k}\right)W_f\right]}{2}$
ویبول Weibull	$\frac{1}{k}\left(\left(\frac{m-1}{m}\right)^{1/m}\right)$	$W_f-(W_f-W_0)\exp\left(-\frac{m-1}{m}\right)$

* W0، Wf، k، m و b به‌ترتیب تولید تخم اولیه، تولید تخم مجانبی نهایی، ضریب رشد نسبی، پارامتر شکل و سن در موقع به‌دست آوردن نصف حداکثر تخم تولیدی هستند.

* W0, Wf, k, m and b are initial egg production, asymptotic egg production, coefficient of relative growth, the shape parameter, and the age at approximately half maximum egg production, respectively.

نتایج و بحث

معیارهای نکویی برازش مدل‌های مختلف برازش شده بر روی رکوردهای تولید و وزن تجمعی تخم در جدول ۳ آورده شده است. مدل‌های برازش شده از لحاظ معیار ضریب تبیین تصحیح شده نزدیک به هم بود، به‌طوری‌که همه مدل‌ها دارای مقدار ضریب تبیین تصحیح شده ۷۰ درصد برای تولید تجمعی تخم و مقدار ۶۸ درصد برای وزن تجمعی تخم بودند. برای سایر معیارهای نکویی برازش، تفاوت بین مدل‌ها از لحاظ معیارهای نکویی برازش تا حدودی آشکارتر بود. مدل لجستیک بالاترین مقدار MSE را برای تولید و وزن تجمعی تخم داشت، درحالی‌که مدل‌های لوپز و ویبول از لحاظ این معیار به‌ترتیب برای تولید و وزن تخم تجمعی کمترین مقدار بودند. همچنین، این دو مدل اخیر دارای بالاترین مقدار R^2_{Adj} هم بودند که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل‌های لوپز و ویبول برای توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم در مرغ‌های خزک نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه بود. مشابه معیار MSE، مقدار معیارهای AIC و BIC برای مدل لجستیک در توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم بالاترین مقدار بود، امّا مقدار این معیارها برای مدل‌های لوپز و ویبول نسبت به سایر مدل‌ها پایین‌تر بود. بنابراین، با توجه به چهار معیار نکویی برازش، مدل لجستیک برای برازش توصیف منحنی تولید و وزن تجمعی تخم در مرغ‌های خزک نسبت به سایر مدل‌ها نامناسب بود، امّا مدل لوپز و متعاقب آن مدل ویبول برای توصیف منحنی تولید تجمعی تخم و مدل ویبول و متعاقب آن مدل لوپز برای توصیف منحنی وزن تجمعی تخم در مرغ‌ها خزک به‌عنوان مدل‌های مناسب می‌باشند.

مقدار R^2_{Adj} برای مدل‌های رشد مورد مطالعه در پژوهش حاضر زیر ۷۱ درصد به‌دست آمد که نسبت به برخی از گزارش‌ها در سایر پژوهش‌ها پایین‌تر می‌باشد (Fairfull and Gowe, 1990; Darmani Kuhi *et al*., 2003; Narinc *et al*., 2010; Sharifi *et al*., 2022). به هر حال، مقادیر مشابه R^2_{Adj} در بررسی منحنی تولید تخم در دو لاین پدری و مادری نژاد قهوه‌ای شیکا گزارش شد (Ahmadu *et al*., 2017). عواملی که می‌تواند بر مقدار R^2_{Adj} برآورد شده در مطالعات تأثیر می‌گذارد، عبارتند از دامنه مقادیر متغییر مستقل (زمان)، ترتیب مقادیر متغییر وابسته در داخل دامنه آن، تعداد تکرار مشاهدات متغییر وابسته، تنوع مقدار متغییر وابسته در هر یک از مقادیر متغییر مستقل (Cornell and Berger, 1986). بنابراین، متفاوت بودن عوامل ذکر شده در مطالعات مختلف و همچنین نوع منحنی (رشد یا تولید تخم) می‌تواند دلیل برآوردهای متفاوت برای مقدار R^2_{Adj} باشد. در مطالعه منحنی تولید تخم و وزن تخم مرغ‌های لگهورن سفید مدل‌های گویا و مورگان مرسر فلودین (مدل لوپز) به‌ترتیب به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی تولید تخم و وزن تخم معرفی شد (Sharifi *et al*., 2022). همچنین در تحقیق بر روی منحنی تولید تخم مرغ مادر گوشتی، مدل گویا و متعاقب آن مدل چند جمله‌ای در مقایسه با مدل‌های لجستیک، لوپز، درجه دوم و سینوسیدی بهترین برازش داشت (Abraham and Murthy, 2017).

جدول ۳- معیارهای نکویی برازش مدل‌های رشد برازش شده

Table 3- The goodness of fit criteria of fitting growth models

مدل Model	میانگین مربعات خطا MSE*	معیار اطلاعات آکائیک AIC	معیار اطلاعات بیزی BIC	ضریب تبیین تصحیح شده R^2_{Adj}
		تولید تجمعی تخم Cumulative egg production		
گمپرتز Gompertz	166.271	87050.03	87079.23	70.42
لجستیک Logistic	168.773	87213.54	87242.75	69.97
ریچادز Richards	164.790	86953.12	86989.62	70.68
لوپز Lopez	164.639	86943.04	86979.54	70.71
ویبول Weibull	164.761	86951.15	86987.65	70.68
		وزن تجمعی تخم Cumulative egg weight		
گمپرتز Gompertz	297527.90	170892.10	170921.30	68.47
لجستیک Logistic	301270.30	171030.40	171059.70	68.08
ریچادز Richards	295590.70	170820.80	170857.40	68.69
لوپز Lopez	295841.90	170830.20	170866.80	68.65
ویبول Weibull	295576.50	170820.30	170856.80	68.68

* میانگین مربعات خطا (MSE)، معیار اطلاعات آکائیک (AIC)، معیار اطلاعات بیزی (BIC) و ضریب تبیین تصحیح شده (R^2_{Adj})

* Mean square error (MSE), Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), and adjusted coefficient of determination (R^2_{Adj})

پنج مدل لجستیک، گمپرتز، ریچاردز، خطی و نمایی بر روی منحنی وزن تخم در دو لاین پدری و مادری نژاد قهوه‌ای شیکا مورد مطالعه قرار گرفت و مدل ریچاردز به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی وزن تخم در دو لاین گزارش شد (Ahmadu *et al.*, 2017). دلیل متفاوت بودن نتایج تحقیق حاضر می‌تواند به‌دلیل تفاوت در گونه و نژاد مورد مطالعه، مدل‌های مورد بررسی در هر تحقیق، میزان مشاهدات مورد استفاده از هر پرنده، انتخاب و برنامه‌های اصلاح نژادی انجام شده در پرنده مورد مطالعه و مدیریت تغذیه‌ای در هر مطالعه باشد که باعث تغییر در منحنی تولید شده و در نتیجه، مدل مناسب برای هر نژاد متفاوت باشد. تفاوت در مطالعات مختلف در معرفی مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی تخم در نژادهای مختلف نشان می‌دهد که منحنی تولید در هر نژادی متفاوت بوده و برای بررسی منحنی تولید در هر نژاد باید از مدل مناسب خاص آن نژاد استفاده کرد. از آنجایی که استفاده از R^2_{Adj} به‌تنهایی به‌عنوان معیار نکویی برازش پرمخاطره است، بنابراین باید از سایر معیارهای دیگر نیز در کنار R^2_{Adj} برای انتخاب مدل مناسب استفاده کرد (Cornell and Berger, 1986)، بنابراین سه معیار دیگر نیز برای انتخاب مدل مناسب علاوه‌بر R^2_{Adj} استفاده شد.

جدول ۴ پارامترهای برآورد شده مدل‌ها برای تولید و وزن تجمعی تخم را نشان می‌دهد. مقادیر برآورد شده برای میزان تولید اولیه (W_0) توسط مدل‌های گمپرتز و لجستیک بالاتر از مقدار واقعی بود، درحالی‌که میزان تولید اولیه در مدل‌های ریچاردز، لوپز و ویبول کمتر از مقدار واقعی برآورد شد. این روند برای تولید تخم نهایی (W_f) برعکس میزان تولید اولیه بود، به‌طوری‌که مقدار تولید نهایی برآورد شده توسط مدل‌های ریچاردز، لوپز و ویبول بیشتر از دو مدل دیگر بود. مقدار پارامتر k در مدل لوپز بالاتر از سایر مدل‌ها بود و کمترین مقدار این پارامتر توسط مدل ویبول برای تولید تجمعی تخم به‌دست آمد. برای وزن تجمعی تخم نیز روند برآورد پارامترها مشابه تولید تجمعی تخم بود، به‌نحوی‌که میزان تولید اولیه (W_0) در مدل‌ها گمپرتز و لجستیک بالاتر از سایر مدل‌ها و مقدار تولید تخم نهایی

(W_f) پایین‌تر از سایر مدل‌ها برآورد شد. همچنین، مقدار پارامتر ضریب رشد نسبی (k) نیز توسط مدل لوپز بالاتر از سایر مدل‌ها برآورد شد، امّا مشابه تولید تجمعی تخم، پایین ترین مقدار k مربوط به مدل ویبول بود.

جدول ٤- پارامترهای برآورد شده مدل‌های مختلف رشد برای تولید تخم و وزن تخم تجمعی

Table 4- Estimated parameters of different growth models for cumulative egg production and egg weight

مدل Model	W_0±SE*	W_f±SE	k±SE	m±SE	b±SE
		تولید تجمعی تخم Cumulative egg production			
گمپرتز Gompertz	6.488±0.218	98.513±1.838	0.063±0.001	-	-
لجستیک Logistic	8.695±0.189	83.210±0.953	0.116±0.002	-	-
ریچادز Richards	3.044±0.563	150.000±19.475	0.023±0.005	-0.767±0.088	-
لوپز Lopez	2.704±0.765	298.211±74.425	1.107±0.067	-	100.000±34.952
ویبول Weibull	3.139±0.683	150.000±21.200	0.019±0.004	1.146±0.055	-
		وزن تجمعی تخم Cumulative egg weight			
گمپرتز Gompertz	236.300±8.832	4031.000±83.640	0.061±0.002	-	-
لجستیک Logistic	321.800±7.655	3345.000±41.180	0.115±0.002	-	-
ریچادز Richards	119.900±21.770	6000.000±818.900	0.024±0.006	-0.689±0.095	-
لوپز Lopez	150.400±25.940	8000.000±1129.000	1.300±0.069	-	57.100±10.640
ویبول Weibull	127.300±26.940	5874.000±825.200	0.020±0.003	1.208±0.059	-

* W_0، W_f، k، m و b: به‌ترتیب تولید تخم اولیه، تولید تخم مجانبی نهایی، ضریب رشد نسبی، پارامتر شکل و سن در موقع به‌دست آوردن نصف حداکثر تخم تولیدی هستند؛ SE: خطای استاندارد

* W_0, W_f, k, m and b are initial egg production, asymptotic egg production, coefficient of relative growth, the shape parameter, and the age at approximately half maximum egg production, respectively. SE: Standard error.

برآورد بالای W_0 و پایین W_f توسط مدل لجستیک در بررسی منحنی رشد در جوجه‌های CCGP (Michalczuk *et al*., 2016)، جوجه‌های خزک (Fairfull and Gowe, 1990) نیز گزارش شد که مشابه نتایج تحقیق حاضر برای منحنی تولید و وزن تجمعی تخم بود. پایین‌ترین برآورد W_0 برای وزن تجمعی تخم توسط مدل ریچاردز به‌دست آمد که مشابه یافته‌های مطالعات دیگر بود (Masoudi and Azarfar, 2017). در بررسی منحنی تولید و وزن تجمعی تخم در مرغ‌های تخم‌گذار و مرغ اجداد جوجه‌های گوشتی نیز برآورد بالا W_0 با مدل‌های لجستیک و گمپرتز و برآورد پایین W_0 با مدل‌های لوپز و ریچاردز گزارش شد که مشابه یافته‌های تحقیق حاضر می‌باشد (Darmani Kuhi and France, 2019).

زمان و میزان تولید در نقطه عطف برآورد شده با مدل‌های مختلف رشد برای تولید تخم و وزن تجمعی تخم در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر برآورد شده برای زمان و میزان تولید در نقطه عطف تولید تجمعی تخم با مدل‌های لجستیک و لوپز به‌ترتیب بالاترین و کمترین مقدار بود. مقدار زمان و تولید در نقطه عطف برآورد شده با مدل لوپز به‌میزان واقعی آن که تقریباً در هفته پنجم و ششم اتفاق می‌افتد، نزدیک‌تر بود. اگرچه بالاترین زمان و میزان تولید در نقطه عطف برای وزن تجمعی تخم توسط مدل لجستیک به‌دست آمد، امّا کمترین مقدار آن مربوط به مدل ویبول بود که به‌مقدار واقعی نیز نزدیک‌تر بود.

جدول ۵- زمان (t_i) و تولید (p_i) در نقطه عطف برآورد شده با مدل‌های رشد

Table 5- Estimated time (t_i) and production (p_i) at inflection point by growth models

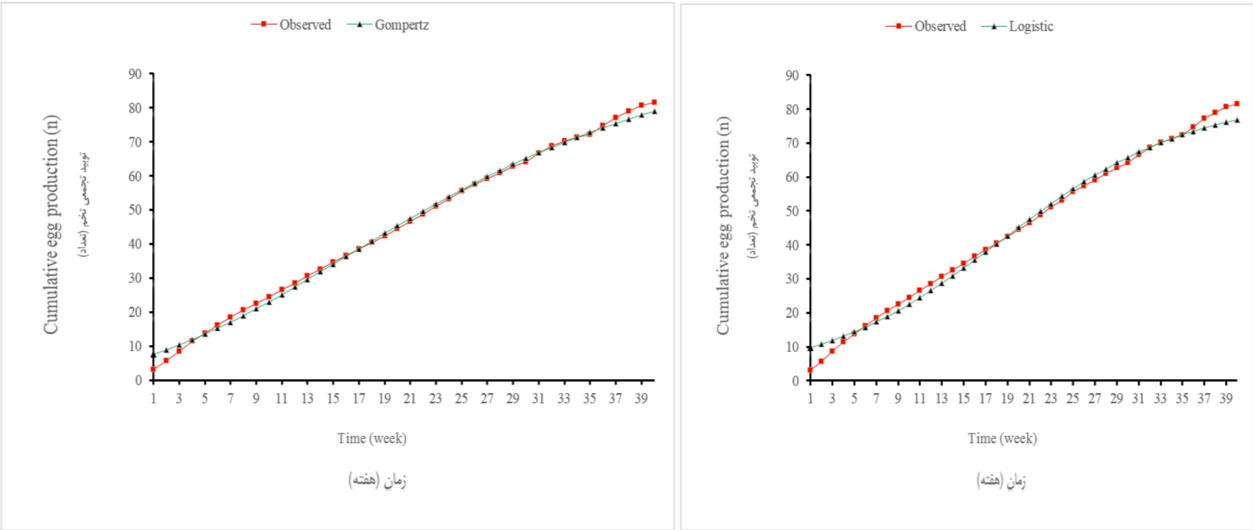
مدل Model	تولید تجمعی تخم Cumulative egg production		وزن تجمعی تخم Cumulative egg weight	
	زمان در نقطه عطف (هفته) (wk) t_i	تولید در نقطه عطف (تعداد) p_i (number)	زمان در نقطه عطف (هفته) t_i (wk)	تولید در نقطه عطف (گرم) p_i (g)
گمپرتز Gompertz	15.88	36.24	17.09	1482.92
لجستیک Logistic	18.52	41.60	19.48	16.72.5
ریچادز Richards	9.29	22.45	12.61	1101.42
لوپز Lopez	6.77	16.98	11.92	1055.77
ویبول Weibull	8.72	20.71	11.66	1036.29

نقطه عطف در منحنی‌های سیگموئیدی بیانگر زمانی است که فاز سریع رشد متوقف و فاز کند آغاز می‌شود. همچنین این زمان لحظه‌ای است که حداکثر نرخ افزایش تولید رخ می‌دهد (Roush and Branton, 2005). در واقع، دو فاز در نقطه عطف به هم وصل شده و در این نقطه تولید شیب تندی داشته که مربوط به اوج تولید است (Darmani Kuhi and France, 2019). در این تحقیق، زمان نقطه عطف برای تولید تجمعی تخم توسط مدل مناسب (مدل لوپز، جدول ۳) بین هفته ششم و هفتم به‌دست آمد که تا این مدت تولید تجمعی تخم ۱۶/۹۸ تخم است. هر چه زمان نقطه عطف دیرتر اتفاق بیافتد، می‌تواند در تولید سالیانه تأثیر بگذارد. زمان پیک تولید مرغ‌های فایومی توسط مدل گاما و مک‌نالی به‌ترتیب ۱۵/۵ و ۱۵/۲۵ هفته بعد تولید گزارش شده است (Mahmoud *et al.*, 2021) که بالاتر از یافته‌ها تحقیق حاضر بود. به هرحال هفته هفتم پس از تولید به‌عنوان زمان پیک برای مرغ مادر گوشتی (Otwinowska-Mindur *et al.*, 2016) و مرغ کاستلانا نگرا (Miguel *et al.*, 2007) گزارش شد که مشابه یافته‌های تحقیق حاضر است.

مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف رشد در هفته‌های مختلف تولید برای تولید و وزن تجمعی تخم به‌ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های گمپرتز، لجستیک و ریچاردز در اوایل و اواخر هفته‌های تولید نسبت به مقدار واقعی تفاوت دارند. بنابراین، این مدل‌ها منحنی تولید تجمعی تخم را به‌طور صحیح‌تر نمی‌توانند پیش‌بینی و توصیف کنند. مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های لوپز و ویبول به مقادیر واقعی آن در هفته‌های مختلف نزدیک‌تر بوده و به‌خصوص برای مدل لوپز که مقادیر پیش‌بینی آن به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است (شکل ۲). برای وزن تجمعی تخم پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف، مدل‌های گمپرتز و لجستیک (شکل ۳) به‌ترتیب پیش‌بینی‌های بالاترین و پایین‌تری نسبت به مقدار واقعی در ابتدا و انتهای هفته‌های تولید دارد، امّا برای مدل‌های دیگر (شکل ۴) مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر واقعی نزدیک است. در سه مدل ریچاردز، لوپز و ویبول، مقادیر پیش‌بینی شده در اوایل هفته برای مدل ویبول نزدیک‌تر به مقدار واقعی بوده و نسبت به دو مدل ریچاردز و لوپز به‌طور صحیح‌تر منحنی وزن تجمعی تخم را پیش‌بینی می‌کند.

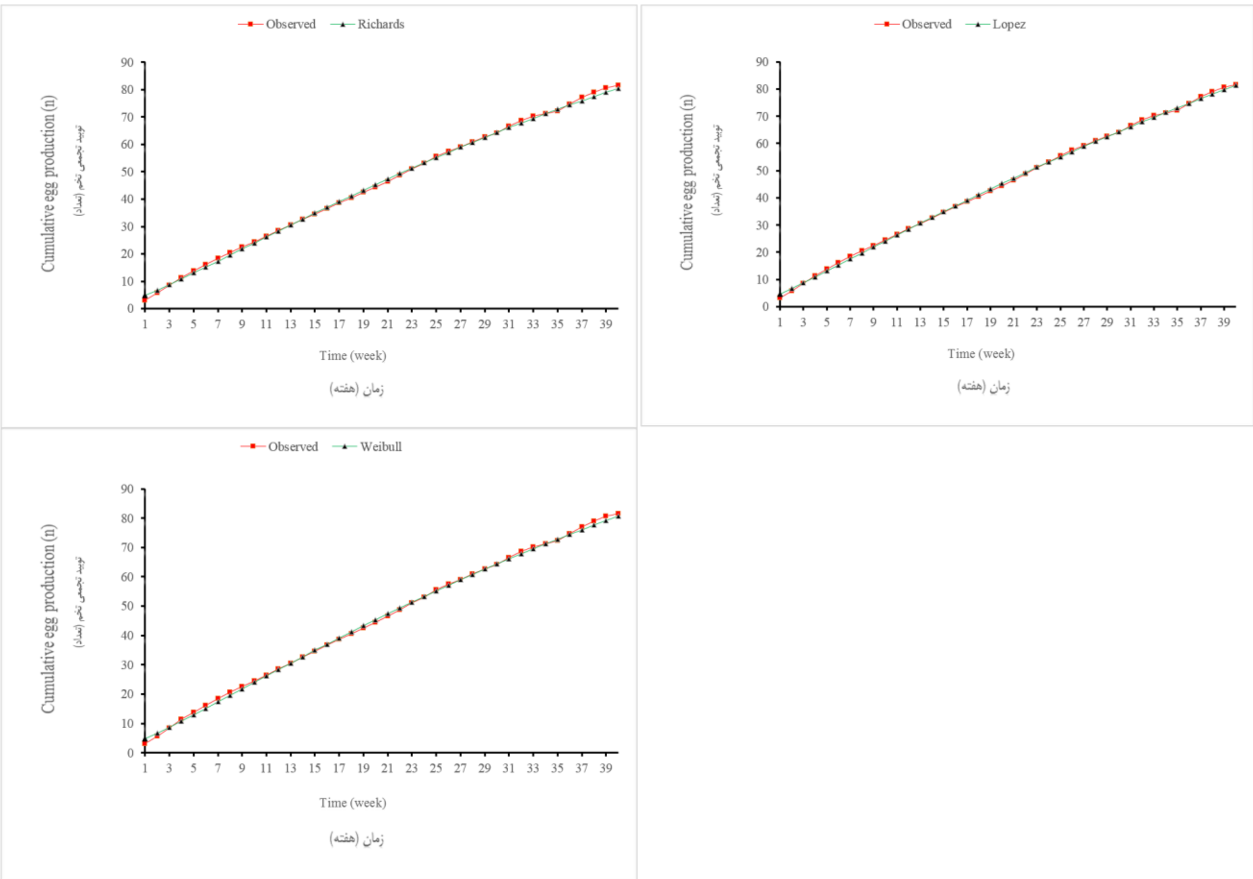
در مدل‌هایی که مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی در فواصل کوتاهتری تفاوت دارند، بهتر از مدل‌هایی می‌باشند که تفاوت آن‌ها در فواصل طولانی‌تر اتفاق می‌افتد (Adenaike *et al.*, 2017). در این تحقیق نیز تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی در مدل لوپز برای تولید تجمعی تخم و مدل ویبول برای وزن تجمعی تخم در بسیاری از زمان‌ها باهم انطباق داشت. در مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقدار واقعی وزن بدن در پنج مرغ بومی ایتالیا (Rizzi *et al.*, 2013) و مرغ خزک (Fairfull and Gowe, 1990) گزارش شد که مدل لجستیک وزن ابتدایی را بالاتر از حد و وزن نهایی را پایین‌تر پیش‌بینی می‌کند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت، به‌طوری‌که در مدل لجستیک این تفاوت در ابتدا و انتهای نمودارها بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی کاملاً مشهود است.

مهم‌ترین کاربرد مدل‌های تولید تخم در طیور برآورد ارزش اقتصادی و ژنتیکی توسط پیش‌بینی کل تولید تخم از بخشی از رکوردها است (Sharifi *et al.*, 2022). مدل‌های ریاضی مناسب به‌طور دقیق کل فاز تولید مرغ را به‌صورت پارامترهای قابل توجیه بیولوژیکی نشان داده و می‌تواند به‌عنوان صفات جداگانه برای هر پرنده برای مقایسات و تفسیرهای بیولوژیکی استفاده شود.



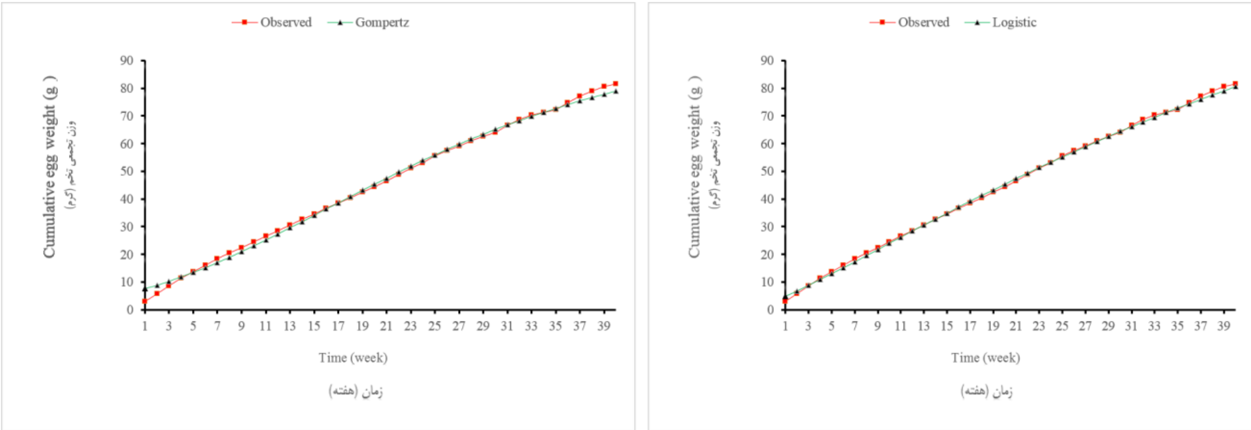
شکل ۱- مقادیر تولید تجمعی تخم واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های گمپرتز و لجستیک در هفته‌های مختلف

Figure 1- Actual and predicted values of cumulative egg production by Gompertz and Logistic models in various weeks



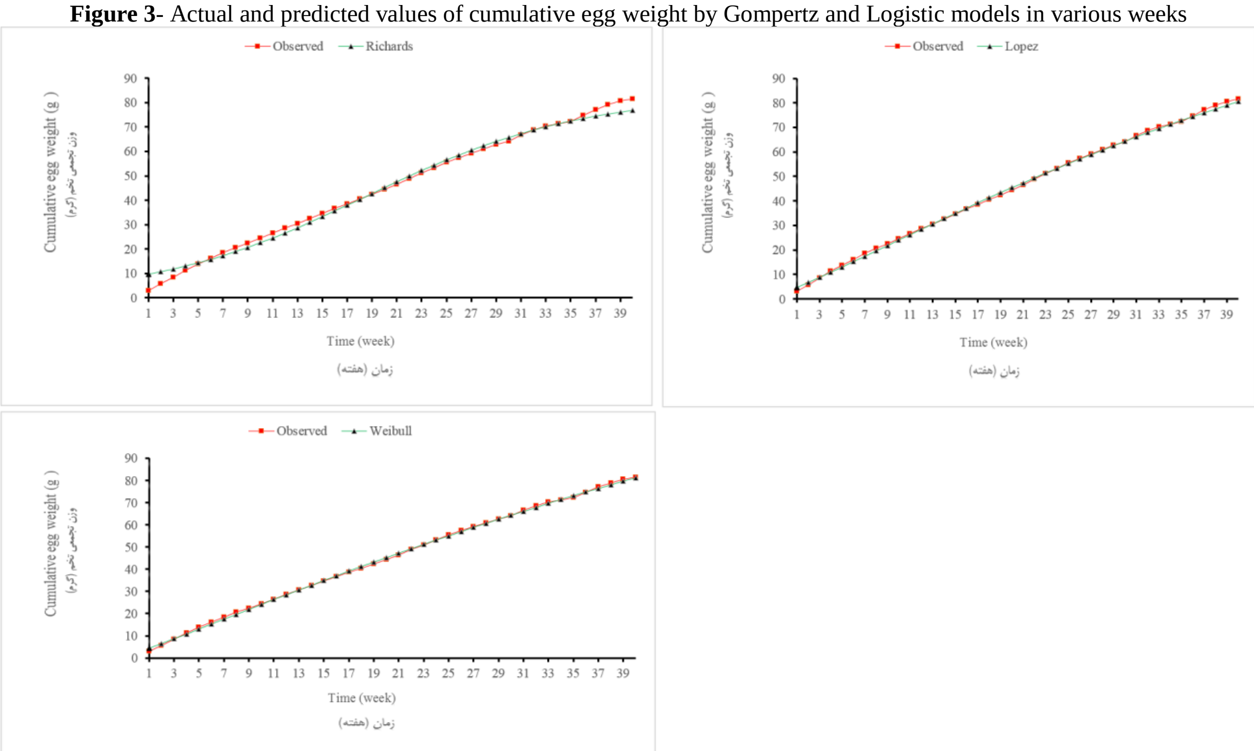
شکل ۲- مقادیر تولید تجمعی تخم واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریچاردز، لوپز و ویبول در هفته‌های مختلف

Figure 2- Actual and predicted values of cumulative egg production by Richards, Lopez and weibull models in various weeks



شکل ۳- مقادیر وزن تجمعی تخم واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های گمپرتز و لجستیک رشد در هفته‌های مختلف

Figure 3- Actual and predicted values of cumulative egg weight by Gompertz and Logistic models in various weeks



شکل ٤- مقادیر وزن تجمعی تخم واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریچاردز، لوپز و ویبول در هفته‌های مختلف

Figure 4- Actual and predicted values of cumulative egg weight by Richards, Lopez and weibull models in various weeks

علاوه‌براین، با عنایت به اینکه تولید فردی مرغ‌ها مؤید وضعیت تولیدی گله است، می‌تواند در راستای بهینه‌تر شدن منابع هزینه‌ای و بهینه نمودن تولید گله از صفات یاد شده برای برنامه‌های اصلاح نژادی در آینده استفاده کرد. همچنین تجزیه و تحلیل دقیق از چرخه تولید، توصیف مراحل منحنی در طول زمان را فراهم کرده و پیش‌بینی تولید، پیش‌بینی بلندمدت عملکرد تولید، و برنامه‌ریزی اقتصادی تولید و تصمیم گیری را تسهیل می‌کند (Yang and Wu, 1989; Groen *et al.*, 1998). امروزه مدل‌های رشد در دستگاه‌های زیستی اهمیت ویژه‌ای داشته و از طریق تجزیه و تحلیل و مطالعه منحنی‌های رشد در طیور این امکان وجود دارد تا مراحل رشد آن‌ها با قوانین رشد شناخته‌شده انطباق داده شده، تا به کمک آن‌ها برنامه‌های مدیریتی و تغذیه‌ای جهت بهبود و اثرات پرورش ارائه گردد. به‌علاوه از منحنی‌های رشد می‌توان جهت ارزیابی پتانسیل ژنتیکی نیز استفاده نمود (Aggrey, 2000). شکل منحنی به تولیدکننده نشان می‌دهد که آیا نیازی به تغییر برنامه تغذیه وجود دارد یا ندارد. همچنین توصیف ژنتیکی منحنی می‌تواند در تعیین استراتژی‌های انتخاب به‌منظور تغییر شکل منحنی مفید باشد. در برنامه‌های اصلاح نژادی آگاهی از شکل منحنی می‌تواند ابزار مناسبی برای تصمیماتی

باشد کـه بـرای انتخـاب نسـل بعـد اتخـاذ مـی‌گـردد (Akbas and Yaylak, 2000).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد کـه کلیـه مـدل‌هـای رشـد مـورد مطالعه به‌خوبی روی رکوردهای تولیـد و وزن تجمعـی تخـم بـرازش شدند. براساس چهار معیار نکویی برازش مدل‌های لـوپز و ویبـول بـه ترتیب مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنـی تولیـد و وزن تجمعـی تخم انتخاب شدند. همچنین دو مدل مذکور با صحت بالاتری نسـبت به سایر مدل‌های تولید و وزن تجمعی تخم واقعی را پیش‌بینی کردند. بنابراین، این دو مدل می‌توانـد بـرای توصـیف منحنـی تولیـد و وزن تجمعی تخم در مرغ خزک استفاده شود. کاربرد این مدل‌های رشد در مدیریت تغذیه‌ای و پیش‌بینی تولید تجمعـی از تعـداد و وزن تخـم در پرورش طیور مفیـد خواهـد بـود و از آنجـایی تولیـد فـردی مـرغ‌هـا نشان‌دهنده وضعیت تولیدی گله است، این صفات می‌تواند در بهینه‌تر شدن منابع هزینه‌ای و بهینه نمودن تولید گله برای برنامه‌های اصلاح نژادی در آینده استفاده شود. همچـنین پارامترهـای مـدل مناسـب از جمله زمان و تولید در نقطه عطف نیز می‌تواند به‌عنوان صفات مهم در برنامه‌های اصلاح نژادی جهت بهبـود و تغییـر منحنـی تولیـد و وزن تجمعی تخم مدنظر قرار گیرند.

سپاسگزاری

نویسندگان از پژوهشکده دامهای خاص بابت همکاری در اجـرای این پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. این طرح بـا حمایـت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل انجام شده اسـت. شـماره طـرح: PR-UOZ-1400-8.

References

1. Abraham, B. L., & Murthy, H. N. N. (2017). Egg production curves and their prediction through mathematical models in a randombred broiler breeder control population. *Indian Journal of Poultry Science, 52*, 16–21.
2. Adenaike, A. S., Akpan, U., Udoh, J. E., Wheto, M., Durosaro, S. O., Sanda, A. J., & Ikeobi, C. O. N. (2017). Comparative Evaluation of Growth Functions in three broiler strains of Nigerian chickens. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, 40*(4), 611-620.
3. Aggrey, S. E. (2002). Comparison of three nonlinear and spline regression models for describing chicken growth curves. *Poultry Science, 81*, 1782–1788. https://doi.org/10.1093/ps/81.12.1782.
4. Ahmadu, A., Kabir, M., Iyiola-Tunji, A. O., Akinsola, O. M., & Igbadun, H. (2017). Mathematical modelling of egg production curves of Shikabrown_ parents. *Nigerian Journal of Animal Production*, *44*, 61–75. https://doi.org/10.51791/njap.v44i1.432.
5. Akbas, Y., & Yaylak, E. (2000). Heritability estimating of growth curve parameters and genetic correlation between the growth curve parameters and weights at different age of Japanese quail. *Archiv fur Geflugelkunde*, *64*(4), 141-146.
6. Bindya, L. A., Murthy, H. N. N., Jayashankar, M. R., & Govindaiah, A. M. (2010). Mathematical models for egg production in an Indian colored broiler dam line. *International Journal of Poultry Science*, *9*, 916–919. https://doi.org/10.3923/ijps.2010.916.919.
7. Darmani Kuhi, H., & France, J. (2019). Modelling cumulative egg production in laying hens and parent stocks of broiler chickens using classical growth functions. *British Poultry Science*, *60*(5), 564-569. https://doi.org/10.1080/00071668.2019.1622080.
8. Darmani Kuhi, H., Kebreab, E., Lopez, S., & France, J. (2003). An evaluation of different growth functions for describing the profile of live weight with time (age) in meat and egg strains of chicken. *Poultry Science*, *82*, 1536–1543. https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1536.
9. Cornell, J. A., & Berger, R. D. (1987). Factors that influence the value of the coefficient of determination in simple linear and nonlinear regression models. *Phytopathology*, *77*(1), 63- 70.
10. Emamgholi Begli, H., Zerehdaran, S., Hassani, S., Abbasi, M. A., & Khan Ahmadi, A. R. (2010). Heritability, genetic and phenotypic correlations of egg quality traits in Iranian native fowl. *British Poultry Science*, *51*(6), 740-744. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2010.528750.
11. Fairfull, R. W., & Gowe, R. S. (1990). Genetics of egg production in chickens. Pages 705–759 in: Poultry Breeding and Genetics. R. D. Crawford, ed. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, the Netherlands.
12. Faraji Arough, H., Rokouei, M., Maghsoudi, A., & Mehri, M. (2019). Evaluation of non-linear growth curves models for native slow-growing Khazak Chickens. *Poultry Science Journal*, *7*(1), 25-32. https://doi.org/10.22069/psj.2019.15535.1355.
13. Gavora, J. S., Liljedahl, L. E., McMillan, I., & Ahlen, K. (1982). Comparison of three mathematical models of egg production. *British Poultry Science*, *23*(4), 339-348. https://doi.org/10.1080/00071688208447967.
14. Gompertz, B. (1825). XXIV. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. In a letter to Francis Baily, Esq. FRS &c. Philosophical

transactions of the Royal Society of London, 115, 513- 583. https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026
15. Groen, A. F., Jiang, X., Emmerson, D. A., & Vereijken, A. A. (1998). Deterministic model for the economic evaluation of broiler production systems. *Poultry Science, 77*, 925 –933. https://doi.org/10.1093/ps/77.7.925.
16. Grossman, M., Gossman, T. N., & Koops, W.J. (2000). A model for persistency of egg production. *Poultry Science, 79*(12), 1715-1724. https://doi.org/10.1093/ps/79.12.1715.
17. Haunshi, S., Suresh, D., Lawrence, L. L. P., Rajkumar, U., Kannaki, R., & Rudranath, C. (2022). Carcass characteristics, meat quality and nutritional composition of Kadaknath, a native chicken breed of India. *Foods, 11*(22), 3603. https://doi.org/10.3390/foods11223603.
18. Lee, Y. P. (2006). Taiwan Country Chicken: A slow growth breed for eating quality. Symposium COA/INRA Scientific Cooperation in Agriculture. Taiwan, R.O.C.
19. Lopez, S., France, J., Gerrits, W. J. J., Dhanoa, M. S., Humphries, D. J., & Dijkstra, J. (2000). A generalized Michaelis-Menten equation for the analysis of growth. *Journal of Animal Science 78*(7), 1816-1828. https://doi.org/10.2527/2000.7871816x.
20. Lordelo, M., Cid, J., Cordovil, C. M., Alves, S. P., Bessa, R. J., & Carolino, I. (2020). A comparison between the quality of eggs from indigenous chicken breeds and that from commercial layers. *Poultry Science, 99*(3), 1768-1776. https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.023
21. Mahmoud, B. Y. F., Emam, A. M., & El-Full, E. A. (2021). Evaluation of four nonlinear models describing egg production curve of Fayoumi layers. *Egyptian Poultry Science Journal, 41*(1), 147-159. https://doi.org/10.15406/ijawb.2017.02.00012.
22. Masoudi, A., & Azarfar, A. (2017). Comparison of nonlinear models describing growth curves of broiler chickens fed on different levels of corn bran. *International Journal of Avian and Wildlife Biology, 2*, 1-7. https://doi.org/10.15406/ijawb.2017.02.00012.
23. Michalczuk, M., Damaziak, K., & Goryl, A. (2016). Sigmoid models for the growth curves in medium-growing meat type chickens, raised under semi-confined conditions. *Annals of Animal Science, 16*, 65-77. https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0061.
24. Miguel, J. A., Asenjo, B., Ciria, J., & Calvo, J. L. (2007). Growth and lay modelling in a population of Castellana Negra native Spanish hens. *British Poultry Science, 48*(6), 651-654. https://doi.org/10.1080/00071660701598414.
25. Narinc, D., Karaman, E., Firat, M. Z., & Aksoy, T. (2010). Comparison of non-linear growth models to describe the growth in Japanese quail. *Journal of Animal and Veterinary Advances, 9*, 1961–1966. https://doi.org/10.3923/javaa.2010.1961.1966.
26. Narinc, D., Karaman, E., Aksoy, T., & Firat, M. Z. (2013). Investigation of non-linear models to describe the long term egg production in Japanese quail. *Poultry Science, 92*, 1676-1682. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02511.
27. Narinc, D., Uckardes, F., & Aslan, E. (2014). Egg Production Curve Analysis in Poultry Science. *World Poultry Science Journal, 70*, 817–828. https://doi.org/10.1017/S0043933914000877.
28. Otwinowska-Mindur, A., Gumułka, M., & Kania-Gierdziewicz, J. (2016). Mathematical models for egg production in broiler breeder hens. *Annals of Animal Science, 16*(4), 1185-1198. https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0037.
29. Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2014). R Core Team, nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-117. Available at http://CRAN.R-project.org/package=nlme.
30. Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany, 10*(2), 290-301. https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290
31. Rizzi, C., Contiero, B., & Cassandro, M. (2013). Growth patterns of Italian local chicken populations. *Poultry Science, 92*, 2226-2235. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02825.
32. Robertson, T. B. (1908). On the normal rate of growth of an individual, and its biochemical significance. *Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 25*(4), 581-614.
33. Roush, W. B., & Branton, S. L. (2005). A comparison of fitting growth models with a genetic algorithm and nonlinear regression. *Poultry Science, 84*, 494-502. https://doi.org/10.1093/ps/84.3.494.
34. Savegnago, R. P., Cruz, V. A., Ramos, S. B., Caetano, S. L., Schmidt, G. S., Ledur, M. C., El Faro, L., & Munari, D. P. (2012). Egg production curve fitting using nonlinear models for selected and nonselected lines of White Leghorn hens. *Poultry Science, 91*, 2977–2987. https://doi.org/10.3382/ps.2012-02277.
35. Sharifi, M. A., Patil, C. S., Yadav, A. S., & Bangar, Y. C. (2022). Mathematical modeling for egg production and egg weight curves in a synthetic white leghorn. *Poultry Science, 101*(4), 101766. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101766.
36. Thornley, J. H. M., & France, J. (2007). Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences, 2nd ed. Oxon, UK, CABI Publishing, Wallingford.
37. Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics, 18*, 293-297
38. Wolc, A., Graczyk, M., Settar, P., Arango, J., O'sullivan, N. P., Szwaczkowski, T., & Dekkers, J. C. M. (2015). Modified Wilmink curve for egg production analysis in layers. In *XXVII* International Poultry Science Symposium *PB WPSA* "Science to practice-practice to science", Bydgoszcz, Poland.

39. Wolc, A., Arango, J., Settar, P., Neil, P., & Dekkers, J. (2011). Evaluation of egg production in layers using random regression models. *Poultry Science*, *90*(1), 30-34. https://doi.org/10.3382/ps.2010-01118.
40. Wood, P. D. P. (1967). Algebraic Model of the Lactation Curve in Cattle. *Nature*, *216*, 164–165. https://doi.org/10.1038/216164a0.
41. Yang, N., Wu, C., & McMillan, I. (1989). New mathematical model of poultry egg production. *Poultry Science, 68*, 476 – 481. https://doi.org/10.3382/ps.0680476.